СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.32

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-59-68

Прогноз кинетики прочности бетона при твердении в условиях, отличных от нормальных

Г.В. Несветаев ✉, Ю.И. Корянова

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ nesgrin@yandex.ru

Аннотация

Введение. При возведении массивных монолитных железобетонных конструкций твердение бетона происходит в нестационарных температурных условиях, отличных от нормальных, что оказывает наряду с показателем массивности конструкции и рецептурными особенностями бетонов значительное влияние на кинетику прочности бетона. Следствием неоднородности температурного поля является различие прочностных и деформационных показателей твердеющего бетона в разных точках конструкции в одно и то же время, в итоге формируется неоднородное поле уровня напряжений. В связи с недостаточным объемом публикаций по вопросу прогнозирования прочности бетона в зависимости от времени и температурных условий твердения бетонов с учетом их рецептурных особенностей, исследования в данной области представляют актуальную задачу, исходя из чего целью работы является получение математической зависимости кинетики прочности различных бетонов от показателя приведенного времени твердения, необходимой для расчета термонапряженного состояния в ранний период твердения в нестационарных температурных условиях массивных железобетонных конструкций.

Материалы и методы. Использованы экспериментальные и расчетные данные авторов, а также результаты, представленные в опубликованных работах и нормативных документах. Произведена теоретическая оценка кинетики прочности бетонов в зависимости от типа цемента по кинетике твердения с учетом фактического тепловыделения твердеющего бетона и его температуры, в т. ч. нестационарной, основанная на следующих положениях: кинетика тепловыделения цемента может рассматриваться как показатель степени гидратации цемента и нарастания прочности; степень гидратации цемента в момент времени определяет пористость цементного камня, а прочность цементного камня и бетона определяется его пористостью.

Результаты исследования. Получена зависимость относительной прочности бетона от показателя приведенного времени твердения в нестационарных температурных условиях для бетонов, различающихся кинетикой твердения в нормальных условиях. Показана хорошая сходимость предложенной зависимости с результатами экспериментальных исследований и некоторыми нормативными документами.

Обсуждение и заключение. Развиты научные представления об оценке относительной прочности бетона, твердеющего в температурных условиях, отличных от нормальных, на основе гипотезы о зависимости кинетики твердения бетона от кинетики тепловыделения цемента с учетом степени зрелости бетона к «приведенному времени твердения». Зависимость целесообразно использовать при расчетах термонапряженного состояния массивных монолитных железобетонных конструкций в ранний период твердения. Показана и обоснована эффективность оценки кинетики прочности различных бетонов, твердеющих в нестационарных температурных условиях, по показателю «приведенное время». При получении показателя учитывались кинетика тепловыделения и величина общей пористости, определенной через показатель степени гидратации. Обосновано использование «приведенного времени твердения» в зависимости от степени зрелости для оценки относительной прочности бетона с учетом его рецептурных особенностей.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, кинетика прочности, температурные условия твердения, кинетика тепловыделения, степень зрелости, пористость, рецептурные особенности бетона

Для цитирования. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И. Прогноз кинетики прочности бетона при твердении в условиях, отличных от нормальных. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):59–68. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-59-68

Original article

Forecasting the Strength Gaining Kinetics of the Concrete Hardening in the Abnormal Conditions

Grigory V. Nesvetaev ✉, **Yulia I. Koryanova**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ nesgrin@yandex.ru

Abstract

Introduction. During construction of the massive monolithic reinforced concrete structures, concrete hardening takes place in the unsteady abnormal temperature conditions, which, along with the massiveness of the structure and concrete recipe features, influence significantly on the concrete strength gaining kinetics. The non-homogeneity of the temperature field leads to the difference of the hardening concrete strength and deformation indicators in the different points of a structure at one and the same time, eventually resulting in formation of the non-homogeneous stress field. Due to the insufficient number of publications dedicated to the topic of forecasting the dependence of the strength of concrete on the time and temperature conditions of its hardening and recipe features, the research in this field becomes a relevant objective. Thus, the aim of the work is to determine a mathematical dependence of the strength gaining kinetics of different concretes on the reduced time of hardening parameter, the dependence which is necessary for calculating the thermal stress of the massive reinforced concrete structures at early-age hardening in the unsteady temperature conditions.

Materials and Methods. The data received during the authors' experiments and calculations, as well as the data available in the existing publications and regulatory documents was used. Theoretical assessment of the concrete strength gaining kinetics, depending on the cement type hardening kinetics, was done. The assessment took into account the actual heat of hydration of the hardening concrete and its temperature, including the unsteady one, and was based on the following provisions: the kinetics of cement heat of hydration can be considered as the cement hydration degree and strength gaining indicator; the cement hydration degree in a given moment of time determines the porosity of a cement brick, and the strength of a cement brick and concrete is determined by the porosity thereof.

Results. The dependence of the relative strength of concrete on the reduced time of hardening parameter in the unsteady temperature conditions is determined for the concretes having different kinetics of hardening in the normal conditions. The good convergence of the proposed dependence with the results of experimental studies and some normative documents is shown.

Discussion and Conclusion. The scientific concepts on the relative strength assessment of the concrete, hardening in the abnormal temperature conditions, have been further developed based on the hypothesis of the concrete hardening kinetics dependence on the kinetics of cement heat of hydration, taking into account the degree of concrete aging per "reduced time of hardening". It's worth to use this dependence for calculating the thermal stress of the massive reinforced concrete structures at early-age hardening. The efficiency of assessing the strength gaining kinetics of the various concretes, hardening in the unsteady temperature conditions, by using the "reduced time" parameter, has been shown and substantiated. The heat of hydration kinetics and the total porosity magnitude, determined by the hydration degree indicator, have been taken into account. The application of the "reduced time of hardening", depending on the concrete aging degree to assess the relative strength of concrete, with regard to its recipe features, has been substantiated.

Keywords: reinforced concrete structures, strength gaining kinetics, hardening temperature, heat of hydration kinetics, aging degree, porosity, concrete recipe features

For citation. Nesvetaev GV, Koryanova YuI. Forecasting the Strength Gaining Kinetics of the Concrete Hardening in the Abnormal Conditions. *Modern Trends in Construction, Urban and Territory Planning.* 2023;2(4): 59–68. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-59-68

Введение. При возведении монолитных железобетонных конструкций твердение бетона происходит в условиях, отличных от нормальных, особенно это характерно для зимних условий или при бетонировании в жаркую погоду [1–3]. Помимо температурных условий внешней среды на температуру твердеющего бетона значительное влияние оказывает показатель массивности конструкций, температура в центре которых может превышать 50 °C при температуре среды менее 20 °C, причем с уменьшением показателя модуля массивности неравномерность температурного поля по сечению конструкции возрастает. Поскольку одним из ключевых вопросов технологического проектирования является определение времени достижения бетоном распалубочной и (или) критической прочности, от которого зависит, в частности, нормокомплект опалубки, сроки загружения конструкций и др., вопросы оценки кинетики прочности в зависимости от фактической температуры и рецептурных особенностей бетонов представляются актуальными [4, 5]. Создание производственной системы контроля, позволяющей при возведении монолитных конструкций управлять температурным режимом выдерживания и кинетикой твердения, является важным условием обеспечения качества работ [6].

Согласно СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» значение критической прочности бетона без противоморозных добавок составляет в зависимости от условий выдерживания и класса бетона от 30 до 80 % от проектной, а распалубочной прочности — в зависимости от вида конструкции — до 80 %. Согласно СП 435.1325800.2018 «Конструкции бетонные и железобетонные монолитные» при разработке технологического регламента бетонирования определяется продолжительность ухода в зависимости от времени достижения критической прочности в конкретных условиях выдерживания. Закономерность нарастания прочности в зависимости от температурного режима выдерживания важна и с позиции предотвращения раннего трещинообразования массивных конструкций посредством регулирования температурно-усадочных напряжений, обусловленных собственными деформациями, с целью обеспечения их соответствия прочности бетона[1] [7], при этом важную роль играет кинетика тепловыделения бетона [8].

Как известно, температура твердения оказывает значительное влияние на кинетику прочности бетона, в связи с чем получение зависимости, позволяющей прогнозировать нарастание прочности бетона с учетом отличающихся от нормальных температурных условий представляет актуальную задачу. Заседателев И.Б и Шифрин С.А. в 1983 г. предложили метод прогнозирования прочности бетона, в т. ч. с химическими добавками, в раннем возрасте по пластической прочности смеси с учетом нестационарного режима твердения с использованием предложенной ими температурной функции. Необходимость определения эмпирического коэффициента перехода от пластической прочности смеси к прочности бетона усложняет метод прогнозирования. В [10] предложено мультипараметрическое уравнение для оценки относительной прочности бетона при зимнем бетонировании. В Р НОСТРОЙ 2.6.17-2016 «Производство бетонных работ в зимний период» и Р-НП СРО ССК-02-2015 «Рекомендации по производству бетонных работ в зимний период» рассматривается определение предела прочности бетона в зависимости от степени зрелости с переходом к эквивалентному времени выдерживания при 20 °C, но при этом, как и в [9], не учитываются кинетические особенности твердения бетонов на различных по темпу твердения цементах, в т. ч. с химическими добавками. В [10] представлен частный пример определения относительной прочности при прогреве конструкции греющими проводами в зависимости от температуры и продолжительности прогрева. В [11] рассматривается задача о формировании температурных полей и прочности бетона при прогреве греющими проводами без учета рецептурных особенностей твердеющего бетона. В [12] предложена зависимость относительной прочности бетона от показателя «зрелость бетона» $T{\cdot}\tau$, °С·ч, и средней температуры бетона T, °С, к моменту фиксируемого времени выдерживания τ, ч:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = \exp\left(0{,}35{\cdot}\left(1 - \left(\frac{15800 - 122{,}5{\cdot}T}{T{\cdot}\tau}\right)^{0{,}55}\right)\right), \quad (1)$$

$$\mathrm{T} = \frac{ЗБ}{\tau}, \quad (2)$$

где ЗБ — показатель зрелости бетона, °С·ч, за время выдерживания τ, ч.

Данная зависимость также не учитывает влияния рецептурных факторов на кинетику твердения.

Таким образом, прогноз прочности бетона в зависимости от времени и температурных условий твердения бетонов с учетом их рецептурных особенностей представляет актуальную задачу, в связи с чем далее предложен и обоснован подход к оценке относительной прочности твердеющих в нестационарных температурных условиях бетонов, различающихся, в зависимости от рецептуры, кинетикой твердения в нормальных условиях.

[1] *Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures*. *State of the art*: Norwegian Public Roads Administration; 2011. 142 p. URL: https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2411102/coin31.pdf?sequence=1 (дата обращения: 02.09.2023)

Материалы и методы. Закономерность нарастания прочности бетона во времени при нормальных условиях в зависимости от типа цемента по кинетике твердения достаточно хорошо изучена и может быть представлена, например, в виде формулы EN 1992-1-1[2]:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = \exp\left(s\left(1-\sqrt{\frac{28}{\tau}}\right)\right), \text{ при } \tau > 1, \quad (3)$$

где R_τ, R_{28} — соответственно предел прочности бетона в возрасте τ и в проектном возрасте; s — коэффициент, учитывающий кинетику твердения бетона в зависимости от типа цемента и наличия добавок, регулирующих кинетику твердения (таблица 1)

Таблица 1

Некоторые данные о кинетике прочности бетона

Бетон по кинетике твердения	Значение s (1)	Время достижения 50 % проектной прочности, сут.	Значение R_2/R_{28}	
			EN 206.1	ГОСТ 25192-2012
Особобыстрый[1]	0,16[1]	1	—	—
Быстрый[1,2,3]	0,25[1]; (0,2)[4]	2	> 0,5	> 0,4
Средний[1,2]	0,33[1]; (0,25)[4]	3	0,3 — 0,5	—
Медленный[1,2]	0,42[1]; (0,38)[4]	4	0,15 — 0,3	≤ 0,4
Очень медленный[1,2,3]	0,6[1]	6	< 0,15	—

Примечание: 1 — предложение авторов; 2 — стандарт EN 206.1; 3 — ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования»; 4 — EN 1992-1-1

Согласно ГОСТ 31108 «Цементы общестроительные» цементы классифицируются по кинетике твердения на быстро-, нормально- и медленнотвердеющие, а согласно приложению А по эффективности при пропаривании, т. е. при твердении при повышенных температурах, цементы делятся на две группы, при этом соотношение активности после пропаривания по стандартному режиму к проектной составляет для классов цементов 42,5 и 52,5 примерно от 0,47 до 0,76. По ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент» (в настоящее время отменен) этот показатель составлял порядка 0,55 — 0,68 для портландцементов первой и второй группы эффективности. Согласно ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов» добавки ускорители (замедлители) твердения должны обеспечивать ускорение (замедление) нарастания предела прочности в суточном возрасте не менее, чем на 30 %, причем согласно [13] данных для обоснованного прогноза влияния температуры на твердение бетонов с добавками в настоящее время недостаточно. Исходя из вышеизложенного, следует сделать заключение о широком диапазоне возможной кинетики твердения бетонов в зависимости от свойств цемента, наличия добавок и температурных условий.

В настоящей работе предложен подход к оценке относительной прочности бетона, твердеющего в температурных условиях, отличных от нормальных, основанный на гипотезе зависимости кинетики твердения бетона от кинетики тепловыделения цемента с учетом степени зрелости бетона ЗБ к моменту τ и эквивалентному времени выдерживания при 20 °С, которое далее будет называться «приведенное время твердения» $\tau_П$ и которое определяется как:

$$\tau_П = \frac{ЗБ}{20}, \quad (4)$$

Теоретическая оценка кинетики прочности бетонов в зависимости от типа цемента по кинетике твердения с учетом фактического тепловыделения твердеющего бетона и его температуры, в т. ч. нестационарной, может быть произведена из следующих общеизвестных положений. Во-первых, кинетика тепловыделения цемента может рассматриваться как показатель степени гидратации цемента и, закономерно, нарастания прочности. Во-вторых, степень гидратации цемента α в момент времени τ определяет пористость P цементного камня, а прочность R цементного камня и бетона определяется его пористостью:

$$R = f(P), \quad (5)$$

$$P = f(\alpha), \quad (6)$$

$$\frac{\alpha_\tau}{\alpha_{28}} = f\left(\frac{Q_\tau}{Q_{28}}\right). \quad (7)$$

Между пределом прочности бетона R_τ в момент τ и величиной тепловыделения Q_τ к этому моменту существует зависимость:

$$R_\tau = f(Q_\tau). \quad (8)$$

[2] EN 1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. URL: https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf (дата обращения: 02.09.2023)

Указанная зависимость (8) может быть представлена, например, в виде:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = b\cdot\left(\frac{Q_\tau}{Q_{28}}\right)^x, \tag{9}$$

где R_τ, Q_τ, R_{28}, Q_{28} —предел прочности и тепловыделение к моменту τ и в проектном возрасте, соответственно.

Пористость цементного камня может быть представлена, например, в виде:

$$P = k\left(\frac{1}{\rho_{Ц}}+\frac{В}{Ц}\right) - \left(\frac{(1+n)\alpha}{\rho_{ГЦ}} + \frac{1-\alpha}{\rho_{Ц}}\right), \tag{10}$$

где $\rho_{Ц}$ — истинная плотность цемента, принимаем в данном примере 3,1 г/см^3; $\rho_{ГЦ}$— истинная плотность цементного камня, принимаем по Пауэрсу 2,443 г/см^3; α — степень гидратации цемента, $\alpha = f\ (Q)$; k — коэффициент, учитывающий уменьшение первоначального объема вследствие контракционной усадки, зависит от степени гидратации цемента, для упрощения расчетов принимаем равным 0,98; n — количество химически связанной воды при полной гидратации цемента, принимаем 24 % от массы цемента.

Тогда пористость цементного камня может быть представлена как:

$$P = 0{,}386 - 0{,}185\alpha. \tag{11}$$

Поскольку предел прочности цементного камня и бетона в момент τ определяется его пористостью, например, в виде:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = \exp(c\cdot P), \tag{12}$$

то с учетом (8) получим в нашем примере:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = \exp\big(c\cdot(0{,}386 - 0{,}185\alpha)\big), \tag{13}$$

или, используя (3) и зависимость [15]:

$$\frac{Q_\tau}{Q_{28}} = \ \exp\ (k\cdot(1-\left(\frac{28}{\tau}\right)^x)), \tag{14}$$

в качестве примера входящие в которую параметры k, x представлены в таблице 2.

Таблица 2

Количественные значения входящих в (5) для бетона класса B25

Темп твердения	Параметры в формуле		
	Q_{28}	k	x
Быстрый	130	0,15	0,47
Медленный	130	0,26	0,7

Допуская

$$\frac{\alpha_\tau}{\alpha_{28}} = \frac{Q_\tau}{Q_{28}}, \tag{15}$$

получим зависимость прочности бетона от тепловыделения в виде:

$$R_\tau = R_{28}\cdot\exp\left(c\cdot\left(0{,}386 - 0{,}185\cdot\exp\ (k\cdot(1-\left(\frac{28}{\tau}\right)^x\right)\right). \tag{16}$$

Результаты исследования. Графический образ (16) в виде зависимости $R_\tau/R_{28} = f(\tau)$ представлен на рис. 1.

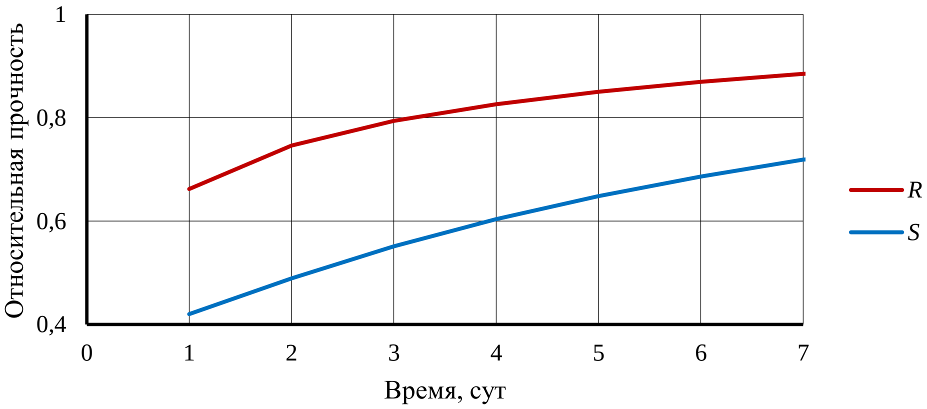


Рис. 1. Расчетная по (12) зависимость относительной прочности бетона:
R, S — соответственно быстро- и медленнотвердеющий бетон

Если представить зависимость (9) в виде:

$$\frac{R_\tau}{R_{28}} = \left(\frac{Q_\tau}{Q_{28}}\right)^{0,7}, \qquad (17)$$

и использовать (14) для оценки кинетики тепловыделения, можно получить расчетные значения показателей кинетики прочности бетона R_τ/R_{28}, представленные совместно со всеми рассматриваемыми результатами на рис. 2.

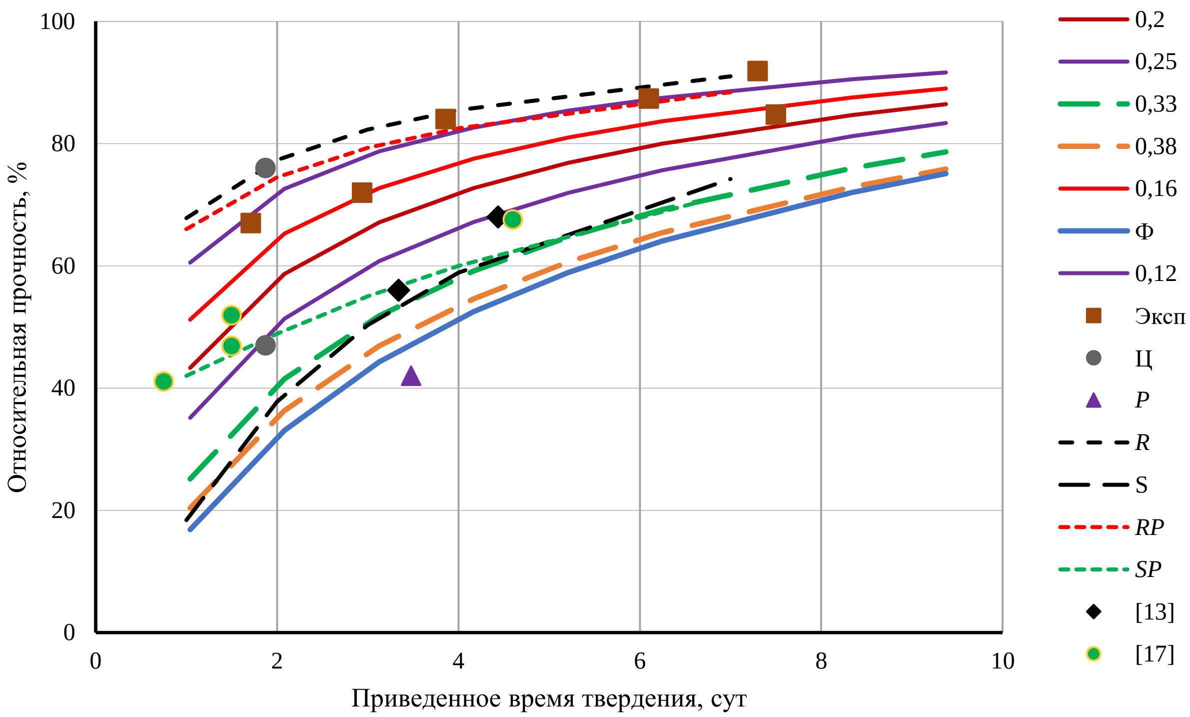


Рис. 2. Зависимость относительной прочности бетона от приведенного времени твердения:
0,12 … 0,38 — значения коэффициента *s* в (3) и таблице 1; Ф — по (1); Эксп — по экспериментальным данным [15];
Ц — данные для цементов по ГОСТ 31108 после стандартной тепловлажностной обработки;
P — по приложению К в Р-НП СРО ССК-02-2015; *R*, *S* — расчетные значения по (17) соответственно
для быстро- и медленнотвердеющих бетонов; *RP*, *SP* — расчетные по (15) (рис. 1); [13] — по данным [11],
бетон *B*30, рецептурные особенности не указаны; [17] — по данным [15], ПЦ 500 с коэффициентом
эффективности при пропаривании не ниже 0,76

Представленные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что:

– цементы по ГОСТ 31108 могут характеризоваться весьма высокими показателями относительной прочности при твердении в температурных условиях, отличных от нормальных, причем эти результаты хорошо согласуются с расчетными значениями кинетики прочности бетонов по (17);

– экспериментальные значения относительной прочности бетонов [14], твердевших в температурных условиях, отличных от нормальных, хорошо согласуются с расчетными по (16) значениями, значения по данным [11, 18] также хорошо согласуются с расчетными;

– расчетные значения по (16) для быстротвердеющих бетонов практически совпадают с расчетными значениями по (17), а для медленнотвердеющих бетонов практически полное соответствие имеет место только для приведенного времени твердения более 4 сут. При времени менее 4 сут. различие с уменьшением приведенного времени твердения значительно возрастает, т. е. для быстротвердеющих бетонов результаты оценки кинетики прочности по кинетике тепловыделения и по величине пористости, определенной через степень гидратации, практически совпадают;

– для бетонов, твердеющих при температурах выше 20 °C и изготовленных на цементах первой группы эффективности при пропаривании по ГОСТ 31108, можно принимать показатель *s* в (3) примерно 0,12…0,16, а для практических целей предварительно 0,2, для бетонов на цементах второй группы — 0,25.

Обсуждение и заключение. Таким образом, относительная прочность бетона в зависимости от показателя его зрелости ЗБ, °С·ч, может быть определена в общем случае по (1) при значении τ, равном приведенному времени твердения $\tau_п$, сут., которое может быть определено в общем случае как:

$$\tau_{\text{П}} = \frac{\text{ЗБ}}{20} = \frac{\int_0^{\tau} f(\text{T} \cdot \tau) d\tau}{20 \cdot 24}, \tag{18}$$

причем числитель в (18) может быть определен по графику «температура — время выдерживания» для любой точки конструкции численным интегрированием, например, методом трапеций.

Предложение по прогнозу прочности с учетом «приведенного времени» формулировалось еще в 1966 г. Запорожцем И.Д. с коллегами [11, 16]. Гипотеза «приведенного времени», согласно которой в моменты равных тепловыделений, т. е. при $Q1 = Q2$… при температурах, соответственно, $T1$ и $T2$, … отношение соответствующих сроков $\tau 1$ и $\tau 2$ остается постоянным на протяжении всего процесса, использована, например, в [18] при расчетах некоторых технологических параметров выдерживания массивных монолитных конструкций, в связи с чем использование предложенного выше «приведенного времени твердения» для оценки относительной прочности бетона с учетом его рецептурных особенностей по показателю степени зрелости представляется вполне обоснованным.

Список литературы

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В., Кардумян Г.С., Ургапов В.И. Опыт возведения уникальных конструкций из модифицированных бетонов на строительстве комплекса «Федерация». *Промышленное и гражданское строительство*. 2006;8:20–22. https://elibrary.ru/item.asp?id=9246707 (дата обращения: 30.08.2023).
2. Калиновская Н.Н., Осос Р.Ф., Кучук Е.В. Бетонирование фундаментной плиты турбоагрегата Белорусской АЭС с применением самоуплотняющегося бетона. *Технологии бетонов*. 2017;3(4):15–19. https://elibrary.ru/item.asp?id=29771157 (дата обращения 30.08.2023).
3. Добрецова И.В., Галактионов Д.Е. Температурный режим и термонапряженное состояние массивных железобетонных элементов конструкций АЭС при их возведении. В: *Доклады и выступления Седьмой научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии»*. Санкт-Петербург: ОАО «РусГидро»; 2013. С. 55–60.
4. Стручкова А.Я., Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Шайбакова А.А. Тепловыделение цемента и расчеты трещиностойкости бетонных массивов. *Инженерно-строительный журнал*. 2018;2(78):128–135. https://doi.org/10.18720/MCE.78.10
5. Муртазаев С.А.Ю., Сайдумов М.С., Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.А. Высокопрочные бетоны повышенной жизнеспособности для конструкций фундаментов МФК «Ахмат-Тауэр». В: *Сборник докладов Международного онлайн-конгресса «Фундаментальные основы строительного материаловедения»*. Белгород: БГТУ имени В.Г. Шухова; 2017. С. 875–883. https://elibrary.ru/item.asp?id=36305899 (дата обращения: 29.08.2023).
6. Журов Н. Н., Комиссаров С.В. Система температурно-прочностного контроля бетона в раннем возрасте. *Вестник МГСУ*. 2010;4–5:296–300. https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-temperaturno-prochnostnogo-kontrolya-betona-v-rannem-vozraste (дата обращения: 30.08.2023).
7. Trong-Chuc Nguyen, Tang Van Lam, Bulgakov BI. Designing the Composition of Concrete with Mineral Additives and Assessment of the Possibility of Cracking in Cement-Concrete Pavement. *Materials Science Forum*. 2018;931:667–673. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.667
8. Макеева А.В., Семенов К.В., Макеев А.А., Амелина А.В. Трещиностойкость массивных бетонных конструкций в строительный период с учетом температурных воздействий. *Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова*. 2019;8:30–38. https://doi.org/10.34031/article_5d49408e0e0b61.97206550
9. Федоров В.И., Местников А.Е. Мультипараметрическое уравнение оценки относительной прочности бетона при зимнем бетонировании. *Современные наукоемкие технологии*. 2018;11(2):227–231. https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37308 (дата обращения: 28.08.2023).
10. Мокшин Д.И., Гаусс К.С., Мокшин Р.И. Моделирование температурных полей и прогнозирование прочности бетона тонкостенных конструкций. Т.Ю. Овсянникова, И.Р. Салагор (ред.). В: *Материалы XI Международной научно-практической конференции «Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения»*. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет; 2021. С. 526–528.
11. Дудин М.О., Ватин Н.И. Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом. *Инженерно-строительный журнал*. 2015;2(54): 33–45. https://doi.org/10.5862/MCE.54.4

12. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. О влиянии условий выдерживания при возведении массивных монолитных железобетонных конструкций на прочность бетона. *Инженерный вестник Дона*. 2021;10. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228 (дата обращения: 30.08.2023).

13. Сердюкова А.А., Рахимбаев И.Ш. О механизме действия ускорителей схватывания и твердения цементной матрицы бетона. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* 2013;2:26–28. http://dspace.bstu.ru/jspui/handle/123456789/810 (дата обращения: 26.08.2023).

14. Несветаев Г.В., Чепурненко А.С., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Оценка некоторых методик для расчета температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных фундаментных плит. *Инженерный вестник Дона*. 2022;7. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7817 (дата обращения: 30.08.2023).

15. Меренкова Н.В. Влияние температурного фактора на скорость набора прочности модифицированного бетона применительно к креплению вертикальных стволов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;7:376–379. https://www.giab-online.ru/catalog/10630 (дата обращения: 02.09.2023).

16. Семенов К.В., Барабанщиков Ю.Г. Термическая трещиностойкость массивных бетонных фундаментных плит и ее обеспечение в строительный период зимой. *Строительство уникальных зданий и сооружений.* 2014;2(17):125–135. https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2014/2(17)/10_semenov_17.pdf (дата обращения: 30.08.2023).

17. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. О влиянии условий твердения на свойства самоуплотняющихся бетонов. *Инженерный вестник Дона.* 2022;10. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7927 (дата обращения: 30.08.2023).

18. Семенов К.В., Стручкова А.Я. Термическая трещиностойкость массивных железобетонных конструкций в строительный период. *AlfaBuild.* 2017;2(2):31–33. https://doi.org/10.34910/ALF.2.6

References

1. Kaprielov SS, Sheinfeld AV, Kiseleva YuA, Prigozhenko OV, Kardymyan GS, Urgapov VI. Erection of Unique Structures Made of Modified Concrete and Used for Construction of the Complex "Federation" MMDTS "Moscow-City". *Industrial and Civil Construction*. 2006;8:20–22. https://elibrary.ru/item.asp?id=9246707 (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

2. Kalinovskaya NN, Osos RF, Kuchuk EV. Concreting the Foundation Plate of the Turbo Unit of the Belarusian Nuclear Power Plant with the Use of Self-Compacting Concrete. *Concrete Technologies*. 2017;3(4):15–19. https://elibrary.ru/item.asp?id=29771157 (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

3. Dobretsova IV, Galaktionov DE. Temperature Regime and Thermal Stress State of Massive Reinforced Concrete Elements of NPP Structures during Their Construction. In: Proceedings of *the Seventh Science and Engineering Conference "Hydropower. New Developments and Technologies"*. St. Petersburg: JSC RusHydro; 2013. P. 55–60. (In Russ.).

4. Struchkova AYa, Barabanshchikov YuG, Semenov KV, Shaibakova AA. Heat Dissipation of Cement and Calculation of Crack Resistance of Concrete Massifs. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;2(78):128–135. https://doi.org/10.18720/MCE.78.10

5. Murtazaev SAYu, Saidumov MS, Alashanov AKh, Murtazaeva TSA. High-Strength Concretes of Increased Viability for Foundation Structures of the Multifunctional Complex "Akhmat-Tower". In: *Fundamental Principles of Building Materials Science. Collection of Reports of the International Online Congress*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2017. P. 875–883. https://elibrary.ru/item.asp?id=36305899 (accessed: 29.08.2023). (In Russ.).

6. Zhurov NN, Komissarov SV. The System of Temperature-Strength Concrete Control at Early Age. *Vestnik MGSU*. 2010;4–5:296–300. https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-temperaturno-prochnostnogo-kontrolya-betona-v-rannem-vozraste (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

7. Trong-Chuc Nguyen, Tang Van Lam, Bulgakov BI. Designing the Composition of Concrete with Mineral Additives and Assessment of the Possibility of Cracking in Cement-Concrete Pavement. *Materials Science Forum*. 2018;931:667–673. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.667

8. Makeeva AV, Semenov KV, Makeev AA, Amelina AV. Crack Resistance of Massive Concrete Structures during the Building Period Taking into Account Temperature Effects. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019;8: 30–38. https://doi.org/10.34031/article_5d49408e0e0b61.97206550 (In Russ.)

9. Fedorov VI, Mestnikov AE. Multi-Parameter Equation of Estimation of Relative Strength of Concrete in Winter Concreting. *Modern High Technologies*. 2018;11(2):227–231. https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37308 (accessed: 28.08.2023). (In Russ.)

10. Mokshin DI, Gauss KS, Mokshin RI. Modeling of Temperature Fields and Forecasting the Strength of Concrete of Thin-Walled Structures. In: Proceedings of the XI International Science and Practical Conference "*Investments, Urban Planning, Real Estate as Drivers of the Socio-Economic Development of the Territory and Improving the Quality of Life of the Population*. Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering; 2021. P. 526–528. (In Russ.)

11. Dudin MO, Vatin NI, Barabanshchikov YuG. Modeling a Set of Concrete Strength in the Program ELCUT at Warming of Monolithic Structures by Wire. *Magazine of Civil Engineering*. 2015;2(54):33–45. https://doi.org/10.5862/MCE.54.4 (In Russ.).

12. Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Sukhin DP. On the Influence Temperature Conditions During Concreting of Massive Monolithic Reinforced Concrete Structures on the Strength of Concrete. *Engineering Journal of Don*. 2021;10. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228 (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

13. Serdyukova AA, Rakhimbaev ISh. On the Mechanism of Action of Accelerators of Setting and Hardening of the Cement Matrix of Concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013;2:26–28. http://dspace.bstu.ru/jspui/handle/123456789/810 (accessed: 26.08.2023). (In Russ.).

14. Nesvetaev GV, Chepurnenko AS, Koryanova YuI, Sukhin DP. Evaluation of Some Methods for Calculating Temperature Stresses when Concreting Massive Reinforced Concrete Foundation Slabs. *Engineering Journal of Don.* 2022;7. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7817 (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

15. Merenkova NV. Influence of a Temperature Factor on Speed of a Set of Durability of the Modified Concrete with Reference to Fastening of Vertical Trunks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;7:376–379. https://www.giab-online.ru/catalog/10630 (accessed: 02.09.2023). (In Russ.).

16. Semenov KV, Barabanshchikov YuG. Maintenance of Thermal Cracking Resistance in Massive Concrete Base Slabs during Winter Concreting. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014;2(17):125–135. https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2014/2(17)/10_semenov_17.pdf (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

17. Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Sukhin DP. On the Influence of Hardening Conditions on the Properties of Self-Compacting Concrete. *Engineering Journal of Don.* 2022;10. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7927 (accessed: 30.08.2023). (In Russ.).

18. Semenov KV, Struchkova AYa. Thermal Cracking Resistance in Massive Concrete Structures in the Building Period. *AlfaBuild*. 2017;2(2):31–33. https://doi.org/10.34910/ALF.2.6 (In Russ.).

Поступила в редакцию 01.09.2023
Поступила после рецензирования 15.09.2023
Принята к публикации 16.09.2023

Об авторах:

Несветаев Григорий Васильевич, профессор кафедры «Технология строительного производства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, nesgrin@yandex.ru

Корянова Юлия Игоревна, доцент кафедры «Технология строительного производства», Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, koryanova.yi@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Г.В. Несветаев — формирование основной концепции, цели и задач исследования, обоснование критериев, общее планирование численного и натурного эксперимента, анализ результатов исследований, редактирование текста, корректировка выводов.

Ю.И. Корянова — детальное планирование, организация и реализация исследований, обработка и анализ результатов исследований, подготовка текста, формулировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 01.09.2023
Revised 15.09.2023
Accepted 16.09.2023

About the Authors:

Grigory V. Nesvetaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Construction Production Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Professor, ORCID, nesgrin@yandex.ru

Yuliya I. Koryanova, Cand.Sci.(Engineering), Associate Professor of the Construction Production Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, koryanova.yi@mail.ru

Claimed contributorship:

Nesvetaev GV — formulating the main concept, aim and objectives of the research, substantiation of the criteria, general planning of the numerical and field experiments, analysis of the research results, text editing, correcting the conclusions.

Koryanova YuI — detailed planning, organisation and implementation of the research, processing and analysis of the research results, preparing the text, formulating the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.